

# LP 2020 – Production et transport de l'énergie électrique

16 mai 2021

Clément Gidel & Pascal Wang

## Niveau : L2

## Commentaires du jury

## Bibliographie

🔗 *Le nom du livre, l'auteur*<sup>1</sup>

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

## Prérequis

- Fonctionnement de la MCC
- Machine synchrone
- Magnétisme dans la matière
- Induction

## Expériences

- ☞ Biréfringence du quartz

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Production</b>	<b>3</b>
1.1	MCC en génératrice . . . . .	3
1.2	Machine synchrone en alternateur . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Transport</b>	<b>4</b>
2.1	Nécessité d'un conditionnement en tension . . . . .	4
2.2	Transformateur . . . . .	5
2.3	Nécessité du triphasé. . . . .	7

## Plan : Clément

Fil rouge : Groupe électrogène ou turbine d'une centrale nucléaire : même chose ! On produit de l'électricité grâce à une première source d'énergie (chimique pour le groupe et thermique pour la centrale). On se demande alors comment on peut produire de l'électricité.

On peut faire : I) Production.

1) MCC en génératrice. On met éventuellement en prérequis en disant qu'on a vu comment on fait un moteur mais qu'on s'est pas intéressé en fonctionnement générateur, ce qu'on va faire maintenant.

2) Machine synchrone en alternateur. Système triphasé en prérequis. On peut rappeler comment on fait un champ tournant et dire qu'ici l'induit c'est le stator et l'inducteur le rotor car c'est lui qui fournit la puissance mécanique.

3) Bilan de puissance. On fait un bilan de puissance et on peut mentionner les différentes pertes tout en disant que c'est pas le but. Donner des ODGs de rendement c'est cool.

II) Transport. On peut positionner le problème facilement en sortie de centrale. On peut montrer avec un calcul rapide que pour minimiser la puissance il faut augmenter la tension.

1) Transformateur. Ainsi on peut faire une sous partie sur le transformateur. Ne pas s'attarder sur les pertes mais bien dire qu'on a ce qu'on veut, on a augmenté la tension.

2) Nécessité d'un système triphasé. Sous partie rapide sur le fait qu'avec du triphasé on perd moins de puissance (cf poly de Jérémy).

Pour la partie transport on peut partir d'un cas concret (the current war) et donner les caractéristiques du DC et AC en tant qu'électricité transportée, et faire le calcul que fait Jérémy Neuveu pour la puissance transportée en AC et pq le triphasé c'est le mieux !

## A faire

# Introduction

## 1 Production

### 1.1 MCC en génératrice

Ici on peut reprendre la partie sur la MCC de Pascal, on met pas en prérequis et on fait un dvlpt rapide où on met moins l'accent sur les détails techniques de fonctionnement plus sur l'aspect conversion électromécanique de puissance et qu'on a un fonctionnement générateur possible ! Le bilan de puissance avec le rendement est bien !

↓ *En pratique on utilise plutôt des machines asynchrones pour produire de l'électricité.*

### 1.2 Machine synchrone en alternateur

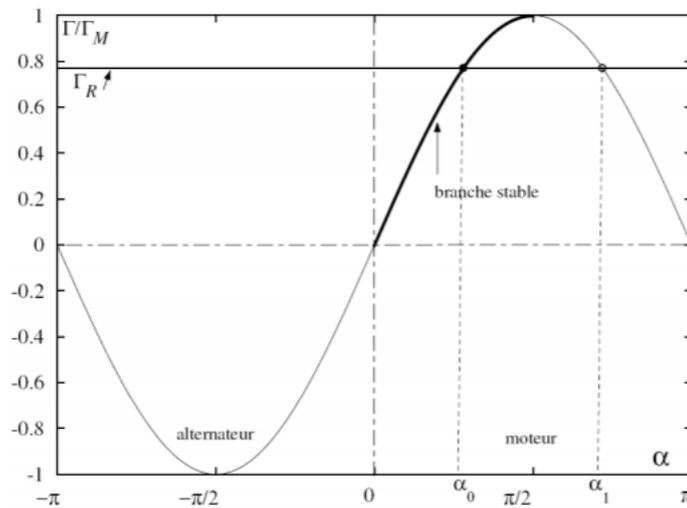


FIGURE 12 – Caractéristique  $\Gamma(\alpha)$  d'une machine synchrone.

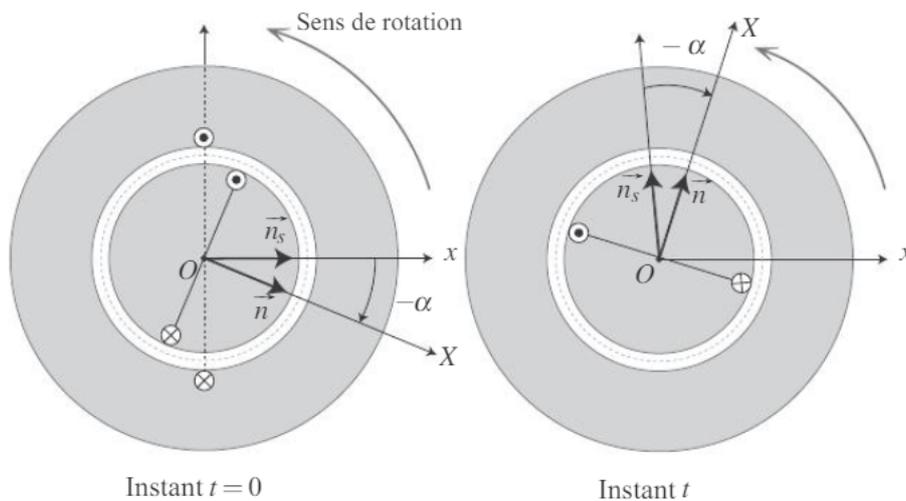


Figure 26.11 – Position relative du rotor et de  $\vec{B}_s$ .

On peut faire un rappel sur comment marche une machine synchrone, donner par exemple le graphe suivant et dire qu'on étudie cette fois-ci le fonctionnement alternateur. : **Il faut faire un schéma au tableau pour introduire**

**les notations.**

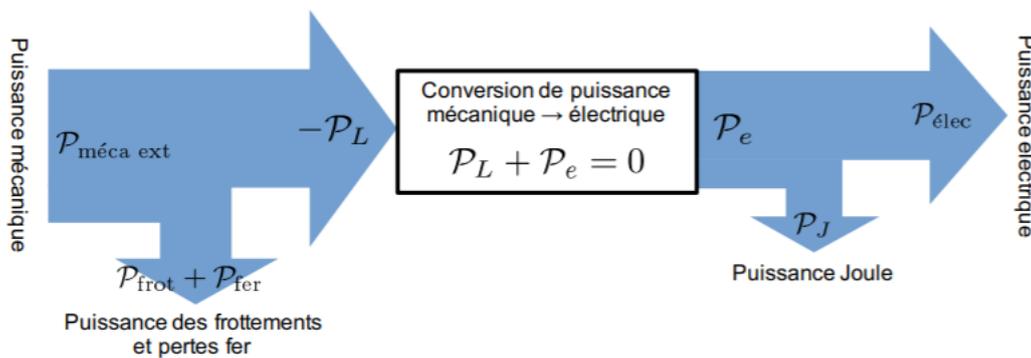
Le moteur synchrone est réversible, il peut fonctionner en générateur, et on le nomme alors alternateur. Le moment magnétique du rotor est la source du champ magnétique, dont le flux dans les enroulements du stator (constitué de trois bobinages qui ne sont plus alignés) est alternatif à cause de la rotation. On obtient donc un ensemble triphasé de forces électromotrices à la fréquence de rotation du rotor. Le rotor est alors appelé inducteur et le stator induit. Dans ce cas, le couple  $\Gamma_n$  est moteur et le couple  $\Gamma_z$  est résistant, donc  $\alpha$  est négatif : le moment magnétique est en avance sur le champ magnétique créé par les courants statoriques. Ce mécanisme est effectivement utilisé pour la production d'énergie électrique à partir d'énergie mécanique, le rotor étant mis en mouvement par des turbines à vapeur dans les centrales thermiques ou nucléaires, ou par un moteur à explosion dans les groupes électrogènes portatifs. Un générateur synchrone peut absorber un couple maximale  $\Gamma_{\max} = 3B_S M/2$ , donc dans le cas d'un pic de demande trop fort sur le réseau électrique, les génératrices peuvent décrocher.

**Bilan de puissance :**

Pour une machine fonctionnant en alternateur à l'aide d'une puissance mécanique fournie  $\mathcal{P}_{\text{méca ext}} > 0$ , de la même manière le bilan de puissance réalisé sur la machine tournante en tant que système mécanique et électrique est :

$$\mathcal{P}_{\text{méca ext}} = \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{\text{frot}} + \mathcal{P}_{\text{fer}} - \mathcal{P}_{\text{élec ext}}$$

avec  $\mathcal{P}_{\text{élec ext}} < 0$  la puissance électrique récupérable si la puissance mécanique fournie est suffisante pour compenser les pertes. Dans le cadre d'un fonctionnement générateur, on a aussi  $\mathcal{P}_e > 0 = ei$  car l'énergie magnétique stockée dans les circuits inductifs est convertie en énergie électrique apportée au système, et  $\mathcal{P}_L < 0$  car les forces de Laplace sont résistantes et absorbent de l'énergie mécanique au système étudié.



↓ Maintenant qu'on a produit, comment on transporte ?

## 2 Transport

### 2.1 Nécessité d'un conditionnement en tension

#### Poly électromagnétisme

Pour être transportée sur de longues distances des lieux de production aux lieux de consommation, l'électricité doit être sous haute tension. Pour le comprendre, on considère le schéma simplifié de distribution de la figure 3.1.

La puissance produite est  $\mathcal{P}_p = U_{\text{HT}} I$ . La puissance dissipée dans les câbles est  $\mathcal{P}_d = RI^2$  donc  $\mathcal{P}_d = R \frac{\mathcal{P}_p^2}{U_{\text{HT}}^2}$  ainsi :

$$\frac{\mathcal{P}_d}{\mathcal{P}_p} = R \frac{\mathcal{P}_p}{U_{\text{HT}}^2}$$

Pour une puissance produite  $\mathcal{P}_p$  fixée, il faut que  $U_{\text{HT}}$  soit aussi grand que possible pour minimiser les pertes par effet Joule dans les câbles de transport d'électricité.

**Ordres de grandeur :** Pour un diamètre de câble en cuivre de 5 cm, d'une longueur de 50 km et une puissance donnée de 1 GW (une grande ville) : - pour  $U = 400\text{kV}$  (haute tension) :  $\frac{\mathcal{P}_d}{\mathcal{P}_p} = 0,2\%$  - pour  $U = 63\text{kV}$  (moyenne tension) :  $\frac{\mathcal{P}_d}{\mathcal{P}_p} = 8\%$  ;

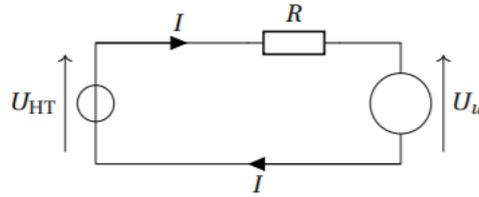


FIGURE 3.1 – Schéma simplifié de distribution électrique.

↓ On a vu qu'il était nécessaire d'avoir de grandes tensions, comment on fait en pratique ?

## 2.2 Transformateur

Sanz PSI

Un transformateur est un appareil qui modifie l'amplitude de tensions et de courants alternatifs. Il se compose d'un circuit magnétique fermé, constitué d'une carcasse ferromagnétique, et de deux enroulements. Le matériau ferromagnétique est choisi pour sa capacité à canaliser les lignes de champ magnétique. Ainsi, il n'existe de champ magnétique qu'à l'intérieur du circuit magnétique. Les enroulements sont constitués de fils de cuivre, bobinés autour du circuit magnétique.

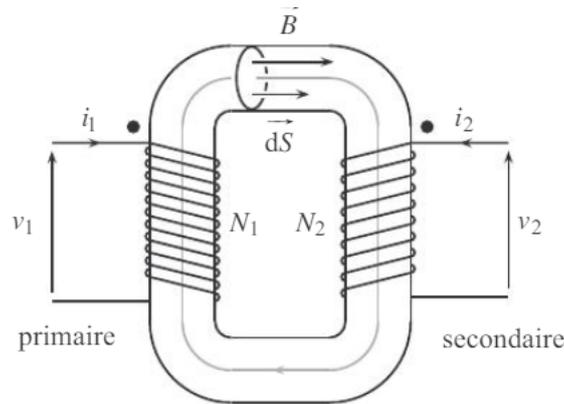


Figure 24.18 – Transformateur.

L'enroulement primaire, ou plus simplement le primaire, ici constitué de  $N_1$  spires, est celui qui reçoit l'énergie électrique, que restitue à la charge l'enroulement secondaire, ou secondaire, constitué de  $N_2$  spires.

Le primaire, soumis à la tension alternative  $v_1(t)$ , est parcouru par le courant alternatif d'intensité  $i_1(t)$ . Ce courant  $i_1(t)$  crée un champ magnétique variable  $\vec{B}(t)$ . Le ferromagnétique canalise parfaitement ce champ jusqu'au secondaire. Le champ variable  $\vec{B}(t)$  crée alors un flux variable dans l'enroulement secondaire. Une f.é.m. est donc induite au secondaire. Quel est le lien entre  $v_2(t)$ , tension au secondaire, et  $v_1(t)$ , tension au primaire ? Le flux total à travers les  $N_1$  spires du primaire est noté  $\varphi_1(t)$ , celui au secondaire est  $\varphi_2(t)$ . Les f.é.m. induites au primaire et au secondaire sont alors :

$$e_1(t) = -\frac{d\varphi_1}{dt} \quad \text{et} \quad e_2(t) = -\frac{d\varphi_2}{dt}.$$

Soit  $S$  la section du circuit magnétique. Le flux de  $\vec{B}(t)$  à travers une section droite, c'est-à-dire orthogonale au champ magnétique, est donc  $B(t)S$ . Attendu que le ferromagnétique canalise parfaitement le champ magnétique, le flux à travers les  $N_1$  spires du primaire est  $\varphi_1(t) = N_1 B(t)S$ ; de même à travers les  $N_2$  spires du secondaire  $\varphi_2(t) = N_2 B(t)S$ , avec le même champ magnétique. Ainsi :

$$e_1(t) = -N_1 S \frac{dB}{dt} \quad \text{et} \quad e_2(t) = -N_2 S \frac{dB}{dt}$$

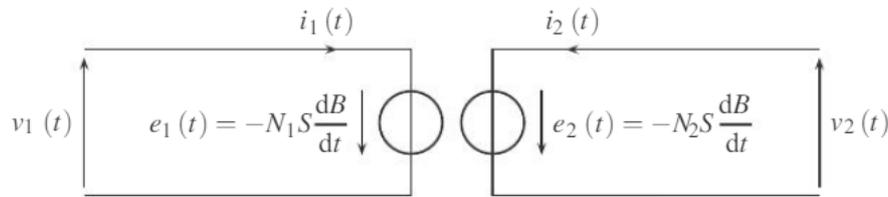


Figure 24.19 – Circuit électrique équivalent du transformateur.

Le schéma électrique équivalent est donc, en se souvenant bien que les f.é.m. induites sont dans le même sens que les courants.

Ainsi  $v_1 = -e_1$  et  $v_2 = -e_2$ . Attendu que  $B(t)$  est variable,  $\frac{dB}{dt}$  est différent de 0 :

$$\begin{cases} v_1(t) = N_1 S \frac{dB}{dt} \\ v_2(t) = N_2 S \frac{dB}{dt} \end{cases} \text{ implique } \frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} = m.$$

où  $m$  est le rapport de transformation.

Les tensions primaire et secondaire, dans un transformateur en régime alternatif, sont reliées par le rapport de transformation  $m$  :

$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

**Complément à mentionner :** On montre qu'on a de même  $\frac{i_2}{i_1} = -\frac{1}{m}$  ce qui donne la conservation de la puissance  $u_2 i_2 = u_1 i_1$  ce qui est naturel vu qu'on a un modèle sans pertes.

**Bonus :** On peut mentionner les pertes (cuivres, fer, pertes de flux ) [Poly électromagnétisme TP](#)

- Pour un milieu magnétique de perméabilité  $\mu_r$ , le théorème d'Ampère s'écrit :

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = l \frac{\Phi}{\mu_0 \mu_r S} \equiv \mathcal{R} \Phi$$

On a noté  $l$  la longueur du circuit magnétique,  $S$  sa section et  $\Phi$  le flux au sein du circuit magnétique. Cette relation définit la réluctance  $\mathcal{R}$  du circuit magnétique, c'est-à-dire sa capacité à s'opposer à sa pénétration par un champ magnétique. Si on impose  $u_1$ , le flux  $\Phi$  se trouve imposé et on peut écrire :

$$i_1 = m i_2 + i_L$$

Ce qui peut s'interpréter comme une loi des nœuds où un dipôle est traversé par l'intensité  $i_L$ . Ce dipôle est une pure inductance de valeur  $L = \frac{n_1^2}{\mathcal{R}}$ . Le courant  $i_L$  est appelé courant magnétisant.

- On nomme pertes fer et on note  $\mathcal{P}_F$  les pertes d'énergie sous forme de chaleur dans le matériau ferromagnétique à cause des phénomènes d'hystérésis et des courants de Foucault : ces pertes ne sont pas négligeables. On peut représenter ces pertes par une résistance équivalente  $R_F$  telle que  $\mathcal{P}_F = e_1^2 / R_F$
- Le couplage entre le primaire et le secondaire n'est pas parfait : une partie du flux qui traverse le primaire ne traverse pas le secondaire et inversement : ces fuites sont prises en compte par l'ajout de deux inductances  $L_1$  et  $L_2$  sur le schéma 3.5. Ces inductances ne correspondent pas aux inductances des bobines et ne peuvent être mesurées directement.
- Les résistances des enroulements ne sont pas négligeables : on prend en compte les résistances des enroulements primaire et secondaire  $R_1$  et  $R_2$  : ces résistances peuvent être mesurées à l'ohmmètre. Les pertes dues à la présence de ces résistances sont nommées pertes cuivre.

**ODG :** Citons, par exemple, les transformateurs EDF qui transforment la moyenne tension 20 kV en tension domestique 230 V. ([Sanz](#))

Ceux-ci sont par exemple utilisés par EDF en bout de ligne, d'un côté pour élever la tension électrique de la tension de production (6000 V) à la tension de transport (300 kV), puis à l'autre extrémité pour abaisser successivement cette tension jusqu'à la tension d'utilisation (230 V ou 380 V). Nous utilisons également des transformateurs pour charger les batteries (téléphones et ordinateurs portables par exemple), ils convertissent la tension du secteur de 230 V à 12 V. ([J. Neveu](#))

Le conditionnement est maintenant OK. Mais qu'elle est la forme de la tension dans nos lignes (ou bien dire qu'on voit souvent 3 fils dans les lignes HT, pq?)

### 2.3 Nécessité du triphasé.

Poly J.Neveu

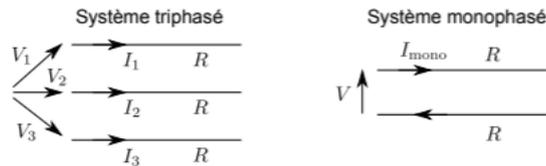


FIGURE 8 – Comparaison des systèmes monophasé et triphasé.

A l'heure actuelle, la majeure partie de la production et du transport de l'énergie électrique se fait sous la forme triphasée. Pour mieux comprendre l'intérêt du triphasé dans le transport de l'énergie, on peut raisonner sur l'exemple suivant présenté figure 8. Nous allons supposer dans un premier temps que les lignes électriques sont réalisées avec des conducteurs de même résistance  $R$  et qu'elles transportent la même puissance  $P$ , à partir de tensions  $V$ . Le système triphasé est supposé équilibré. Si  $I$  est le courant efficace dans les lignes et  $\varphi$  le déphasage des tensions sur les courants correspondants, pour le système triphasé on a :

$$P = 3VI \cos \varphi$$

Transporter en moyenne la même puissance  $P$  sous tension  $V$  sur la ligne monophasée impose  $I_{\text{mono}} = 3I$ . En triphasé, les pertes dans les trois lignes sont :

$$P_{J, \text{tri}} = 3RI^2$$

Avec un système monophasé, l'effet Joule à dissiper dans les deux câbles dans lesquels circulent le courant. est :

$$P_{J, \text{mono}} = 2RI_{\text{mono}}^2 = 2R(3I)^2 = 18RI^2$$

Les pertes en ligne dans ce dernier cas sont donc beaucoup plus importantes. Cependant, le problème n'est pas aussi simple. Pour ne pas abîmer le câble, on ne peut pas dimensionner une ligne qui laisse passer un courant  $I$  comme une ligne qui supporte un courant  $3I$ . La densité surfacique de courant ne doit jamais dépasser une valeur donnée ce qui impose de tripler la section utile de conducteur pour pouvoir tripler le courant. Cela revient à dire que la résistance de la ligne monophasée doit être trois fois moins résistive que son homologue triphasée. On obtient donc les pertes en ligne :

$$P_{J, \text{mono}} = 2 \frac{R}{3} (3I)^2 = 6RI^2$$

Ces pertes sont toujours supérieures à celles rencontrées dans une ligne triphasée. De plus si on compare la quantité de métal utilisée pour réaliser les lignes, on constate que pour une liaison de longueur  $L$ , on aura besoin d'un volume de cuivre  $V_{\text{tri}} = 3LS$  en triphasé et  $V_{\text{mono}} = 2L(3S) = 6LS$  en monophasé. Il est donc nécessaire d'employer une quantité double de matériau dans le cas d'une ligne monophasée, tout en ayant des pertes en ligne doubles ! Le système triphasé est donc bien plus favorable quant au transport de l'énergie que le système monophasé. Les systèmes 6 -phasé et 12 -phasé sont eux aussi plus défavorables que le système triphasé.

**Bonus : Complément historique** : Il faut garder à l'esprit qu'environ 10% de la production électrique nationale est consommée dans le réseau (pertes par effet Joule dans les lignes et pertes dans les transformateurs). Pour diminuer l'effet Joule donc le courant  $I$ , on peut augmenter la tension  $V$  grâce à des transformateurs : c'est pourquoi les grandes lignes de transport de l'électricité sont portées à des tensions de plusieurs centaines de kilovolts. L'emploi de transformateurs pour transporter des hautes tensions fut un argument important qui favorisa le déploiement de la distribution de courant alternatif par rapport au courant continu, à la fin du XIXe siècle.

Néanmoins, il faut constater que la plupart des appareils domestiques fonctionnent en monophasé (four électrique, plaques à induction, alimentation PC, machine à laver...). En pratique, dans la plupart des cas, EDF n'amène qu'une phase chez vous. L'utilisation directe d'énergie électrique sous forme triphasée concerne essentiellement des machines électriques de forte puissance utilisées dans l'industrie et la traction électrique.